

Available online at www.sciencedirect.com**SciVerse ScienceDirect**

Procedia Engineering 27 (2012) 1538 – 1543

**Procedia
Engineering**www.elsevier.com/locate/procedia

2011 Chinese Materials Conference

Study on stress corrosion crack of austenitic stainless steel in simulated ocean environment

Meng Yan^a, Qian Peng^a, Qiwei Yin^{b,*}^aScience and Technology on reactor fuel and materials laboratory, Nuclear Power Institute of China, P.O.Box436-4, 610041, Chengdu, China^bScience and Technology on reactor system design technology laboratory, Nuclear Power Institute of China, P.O.Box622-502, 610041, Chengdu, China

Abstract

Recent studies on stress corrosion cracking properties of 321 bend pipe and pipe with weld、316NG austenitic stainless steel pipe in ocean environment in virtue of slow strain rate tensile stress corrosion crack test are performed in different concentration of NaCl solution. Elongation and max tensile stress are selected as parameters to evaluate the SCC susceptibility based on the phenomenon that elongation and max stress fall as samples being exposed to NaCl solution environment, the results show that 316NG has the best stress corrosion crack resistance and 321 bend pipe materials behavior oppositely. In addition, the influence of differing strain rate and concentration of NaCl solution on properties of materials are researched, elongation increases along with tensile strain rate enhancement, mechanical properties are immune to variety of Cl⁻ concentration from 3.5% to 26.5%.

© 2011 Published by Elsevier Ltd. Selection and/or peer-review under responsibility of Chinese Materials Research Society. Open access under [CC BY-NC-ND license](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/).

Keywords: stress corrosion crack; austenitic stainless steel; slow strain rate; stress corrosion crack; susceptibility

奥氏体不锈钢在模拟海水条件下的应力腐蚀研究

闫萌^a, 彭倩^a, 尹祁伟^{b,*}^a 中国核动力研究设计院反应堆燃料及材料重点实验室, 436 信箱 4 分箱, 610041, 成都, 中国^b 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 622 信箱 502 分箱, 610041, 成都, 中国

摘要

* Corresponding author. Tel.: +86-28-8590-3862; fax: +86-28-8590-6023.

E-mail address: yanmeng_spring@163.com.

以不同浓度 NaCl 溶液作为模拟海水环境，通过慢应变速率拉伸试验，研究了 321 弯管和焊缝部位管段、316NG 奥氏体不锈钢管道材料在海水中的应力腐蚀性能。试验材料在 NaCl 溶液条件下的延伸率以及最大应力均比在大气环境下有不同程度的降低，以延伸率、最大应力作为应力腐蚀敏感性参数的数据表明，316NG 材料耐应力腐蚀性能最好，321 弯管耐应力腐蚀性能最差。试验还研究了不同应变率以及不同溶液浓度对材料力学性能的影响：提高拉伸应变率，延伸率相应地提高；Cl⁻浓度在 3.5%和 26.5%间变化，对材料力学性能影响不大。

关键词：应力腐蚀；奥氏体不锈钢；慢应变；应力腐蚀；敏感性

1. 引言

奥氏体不锈钢虽然具有优良的耐蚀性和耐热性等优点，但经形变加工和焊接后，处于亚稳态的奥氏体在敏感介质下，仍存在着应力腐蚀开裂（Stress Corrosion Cracking，简称 SCC）的隐患。目前，奥氏体不锈钢在一定环境下具有 SCC 倾向已是共识，这对构件和材料都是潜在的威胁^[1]。而海水中的 Cl⁻，就是促使奥氏体不锈钢 SCC 萌生和扩展的敏感环境之一。

为了研究奥氏体不锈钢管段材料在海水 Cl⁻环境下的 SCC 情况，采用浓度分别为 3.5%和 26.5%的 NaCl 溶液模拟海水及海水浓缩环境，在 10⁻⁶/s 应变率下进行慢应变速率拉伸试验（slow strain rate tensile test，简称 SSRT），以获得材料在 Cl⁻溶液中的应力腐蚀敏感性数据。

2. 试验情况

2.1. 试验材料及方法

试验材料包括 321 弯管及带焊缝管段、316NG 直管段材料，采用光滑的片状拉伸试样，其中，带焊缝试样，使焊缝位于试样中心。

根据所需要模拟的环境，采用 3.5%NaCl 溶液模拟海水环境（26.5%NaCl 溶液环境模拟海水浓缩环境），加装环境试验箱等装置进行腐蚀环境模拟。调整试验溶液环境在 80±3℃；设定试验机拉伸模式为慢应变速率控制，相应的拉伸应变率为 10⁻⁶/s。试样断裂后记录最大应力 σ 和延伸率 δ 等参数。

表 1 SSRT-SCC 试样取样情况

Table1 SSRT-SCC specimens

Number	Location	Material
A1	90° bend	321 (0Cr18Ni10Ti)
B1	weld in middle of specimen	321 (0Cr18Ni10Ti)
C1	straight pipe	316NG (00Cr17Ni12Mo2)

根据试样在大气环境、溶液中的应力-应变曲线，计算 SCC 的敏感性参数为： $I_{sc} = (\sigma_a - \sigma_c) / \sigma_a$ （ σ_a 为大气环境下的最大应力， σ_c 为腐蚀介质中的最大应力）、 $I_l = (l_a - l_c) / l_a$ （ l_a 、 l_c 分别为大气环境和腐蚀介质中的延伸率）。敏感性参数值越大，则材料在腐蚀性环境中的 SCC 倾向越大。

2.2. 试验结果

各组试样分别在大气环境下以 1×10⁻⁶/s 和 6×10⁻⁶/s 拉伸，得到大气环境下材料的力学性能，见

表 2。

表 2 试验材料大气环境下的力学性能情况

Table2 Mechanical property of material tested in air environment

Number	Strain rate/s ⁻¹	Max stress/MPa	Elongation/%
A1	6×10 ⁻⁶	625.8	76
B1	1×10 ⁻⁶	598	37.5
C1	6×10 ⁻⁶	592.5	73.5

表 3 SSRT 试样 SCC 敏感性

Table3 SCC susceptibility of SSRT specimen

Number	Stain rate (/s ⁻¹)	Concentration of NaCl solution、80℃	I _σ	I _I
A1	6×10 ⁻⁶	26.50%	21.54	26.32
	6×10 ⁻⁶	3.50%	28.22	30.92
B1	1×10 ⁻⁶	26.50%	13.96	24
	1×10 ⁻⁶	3.50%	16.7	17.3
C1	6×10 ⁻⁶	3.50%	12.5	17.4
	6×10 ⁻⁶	26.50%	8.5	20.6

施加不同浓度的 NaCl 溶液环境，获得 SCC 敏感性参数数据 I_σ、I_I，列于表 3 进行比较。316NG 材料综合敏感性参数最低，表明 316NG 有更优的耐应力腐蚀性能。这是因为，316NG 材料中 Mo、N 元素的添加，以及更低的含 C 量，都对提高 316NG 材料耐应力腐蚀性能起到一定积极作用^[2]。

321 弯管段试样 SCC 敏感性相对较高，说明 321 弯管段材料比 321 焊接部位、316NG 材料更易发生 SCC。

2.3. Cl 溶液环境对材料 SCC 的影响

将 3 组试样在大气环境、3.5%NaCl 溶液环境的最大应力、延伸率作图比较（见图 1），发现材料的最大应力和延伸率在溶液环境中的数值都较大气环境有所下降。321 弯管段试样最大应力下降最为明显，这与弯管试样本来的强度偏高有关，材料的强度与其耐 SCC 性能成反比；并且，弯管处的加工变形也会使材料表面的残余应力更加复杂。321 焊接试样的延伸率在溶液环境下下降最为平缓，这与焊接接头试样原本延伸率低、在溶液环境中试验时间较短、受腐蚀程度更轻有关。

2.4. NaCl 溶液的浓度变化对材料 SCC 的影响

对比 3 组试验材料分别在浓度 3.5%、26.5%NaCl 溶液环境下的最大应力及延伸率数据（见图 2），发现该浓度条件下变化，材料的最大应力、延伸率没有明显变化。这是因为，奥氏体不锈钢在 Cl 溶液环境下发生 SCC 的阈值很低，有时 10ppm 的 Cl 浓度条件下即可发生，3.5%、26.5%的 NaCl 浓度远高于该 SCC 发生值，造成对溶液浓度变化不敏感。

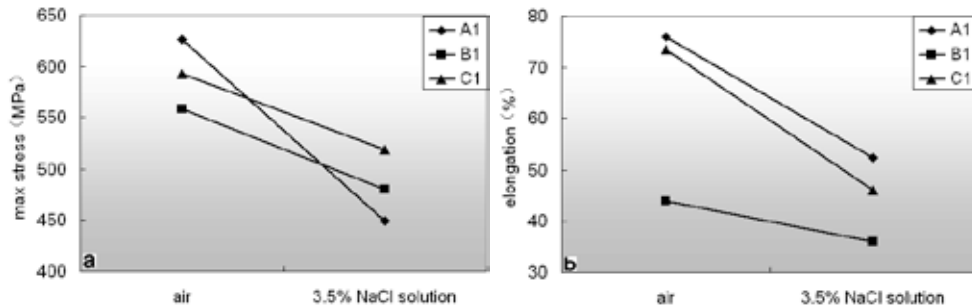


图 1. (a) 试验环境与最大应力的关系

(b) 试验环境与延伸率的关系

Fig. 1. (a) Relationship between environment and max stress, (b) Relationship between environment and elongation

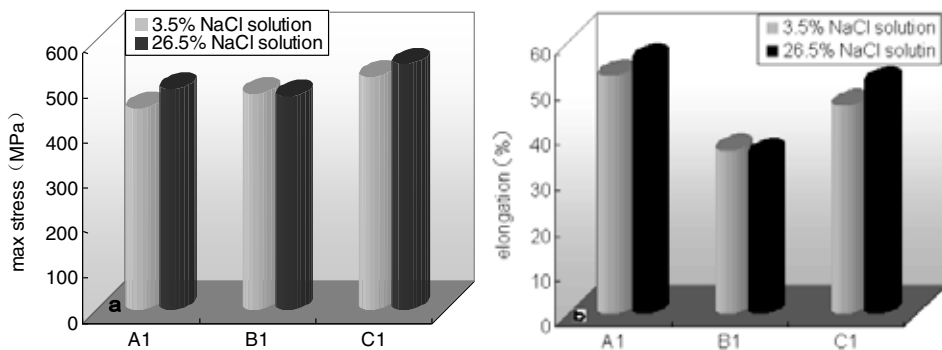


图 2. (a) 最大应力与 NaCl 溶液浓度的关系, (b) 延伸率与 NaCl 溶液浓度的关系

Fig. 2. (a) Relationship between max stress and concentration of NaCl solution, (b) Relationship between elongation and concentration of NaCl solution

2.5. 拉伸速率变化对材料 SCC 的影响

不同拉伸速率对材料性能的影响：相同的试验溶液环境下，对相同材料试样施加不同应变率的 SSRT 试验，根据试验曲线，发现不同应变率下材料的最大应力没有明显差别，但是延伸率随着拉伸速率的提高而增加。拉伸速率更高的条件下，试验时间较短，腐蚀造成的影响较小，因而脆化程度更低。

2.6. 断口形貌分析

对大多数材料，在惰性介质中拉断后将获得韧窝断口，但在 SCC 介质中拉断后往往获得脆性断口。脆性断口比例愈高，则认为 SCC 愈敏感。SSRT 试样经丙酮超声清洗，扫描电镜观察。

NaCl 环境下的 SSRT 试样边缘普遍存在光滑且呈暗色的条带区域，放大观察，该条带区域断面平整，无明显韧窝，认为该区域为 SCC 扩展区域。大部分断面无 SCC 裂纹，少数样件在试样边缘或断面内部存在典型的 SCC 二次裂纹区域形貌区域，区域呈泥状花样等脆性断裂特征。裂纹区域范围为几十至几百 μm ，最小可测裂纹长度为 $30\mu\text{m}$ 左右（见图 3）。从图可见，穿晶扩展的 SCC 裂纹，有的具有腐蚀沟、腐蚀洞和次生裂纹断口形貌。在解理面上，断口呈微小锯齿状解

理，表明在微观尺度上，裂纹扩展受阻而不得不反复改变扩展方向^[3,4]。

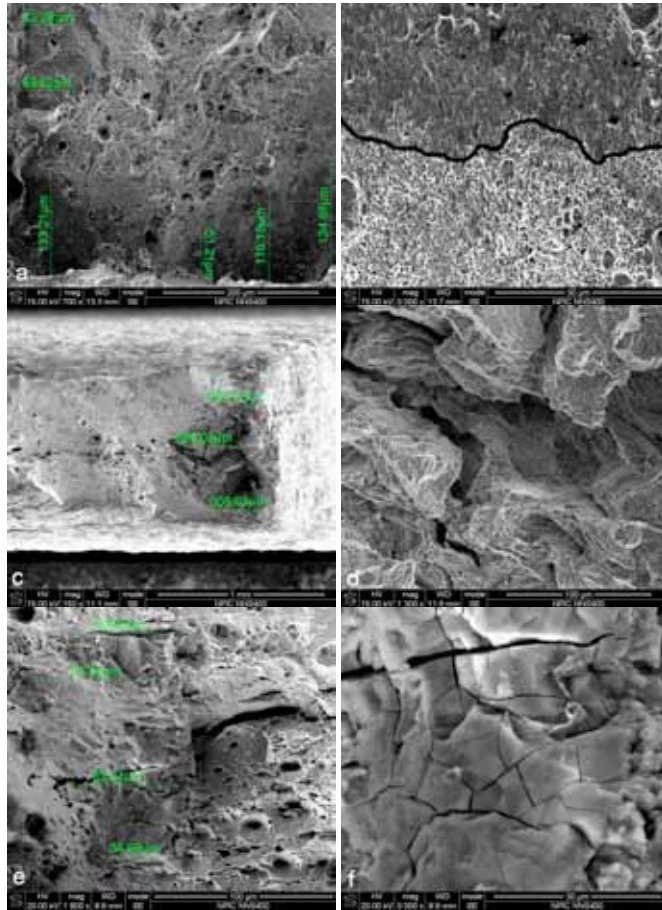


图 3. SSRT 断面形貌((b)(d)(f)分别为(a)(c)(e)的区域放大形貌)

Fig. 3. Morphology on SSRT fracture surface((b)(d)(f)are correspondingly magnified images of (a)(c)(e) respectively)

3. 结论

1. 分别在大气环境、80℃的 3.5%和 26.5%NaCl 溶液中以 10^{-6} /s 进行 SSRT-SCC 试验，采用不同环境下的最大应力、延伸率作为 SCC 敏感性参数对试验材料的 SCC 性能进行对比。结果表明，316NG 材料表现出较好的耐 SCC 综合性能，321 弯管段耐 SCC 能力偏差；
2. 改变拉伸速率、溶液浓度等试验条件，研究改变条件对试验材料 SCC 敏感性的影响。提高拉伸速率，材料的 SCC 延伸率敏感性降低；改变 NaCl 溶液的浓度分别为 3.5%和 26.5%，对材料 SCC 敏感性无明显影响，说明 SSRT-SCC 试验中，NaCl 浓度高于 3.5%、温度处于 80℃条件下，SCC 过程主要受机械载荷影响，受 Cl⁻浓度变化影响不大。
3. SSRT 试样断面四周有暗色光滑断面区，或含有二次裂纹区域，这些区域均为 SCC 扩展区。

致谢

感谢蒋宏曼、付道贵、梁波等同事的支持和帮助。

参考文献

- [1] Sergei A, Shipilov. Solving some key failure analysis problems using advanced methods for materials testing. *Engineering Failure Analysis* 2007;**14**:1550 – 1555.
- [2] Copson HR. *Congress of Metallic Corrosion* 1st. London: April 10-15, 1961.
- [3] Lo KH. Recent developments in stainless steels. *Material Science and Engineering* 2009;**65**:68~69.
- [4] Huang Sj. Stress corrosion cracking behavior of austenitic stainless steels in specific environment. *Petrochemical corrosion and protection* 2005;**22(5)**:10.